

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΑΠΕ



Βισιαδούρος Γ.

Ι. Φραγκιαδάκης – Φ. Μαυροματάκης

Ισχύς κινητικής ενέργειας φλέβας ανέμου

$$P_{av} = \frac{dE}{dt} = \frac{\frac{1}{2} \rho dV v^2}{dt} = \frac{\frac{1}{2} \rho S dx v^2}{dt} = \frac{1}{2} \rho S \left(\frac{dx}{dt} \right) v^2 \Rightarrow$$

$$P_{av} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^3$$

- όπου, S, το εμβαδόν του κύκλου της φτερωτής και ρ, η πυκνότητα του αέρα. Εξαρτάται από τη θερμοκρασία και την πίεση, σύμφωνα με τη σχέση:

$$\rho(\text{kg} / \text{m}^3) = 1,225 \cdot \frac{288,15}{T(\text{K})} \cdot \frac{P(\text{mbar})}{1013,3}$$

Εξάρτηση από την πυκνότητα

- Διαθέσιμη Αιολική Ενέργεια
- Μεταβολή της πυκνότητας ρ με το ύψος από την επιφάνεια της θάλασσας:

Υψόμετρο (σε πόδια)*	Ποσοστό (%) Σε σχέση με την επιφάνεια της θάλασσας	Υψόμετρο (σε πόδια)	Ποσοστό (%) Σε σχέση με την επιφάνεια της θάλασσας
500	99	6000	83
1000	97	7000	80
2000	94	8000	77
3000	91	9000	74
4000	88	10000	70
5000	86		

* 1 πόδι = 0.3048m

$$\rho = 1,225 \cdot \frac{288,15}{T(K)} \cdot \frac{P(mbar)}{1013,3}$$

Η μεταβολή της πυκνότητας του αέρα μεταξύ χειμώνα και καλοκαιριού είναι της τάξης του 10% (~1.225 kgr/m³)

Θεωρία Δίσκου Ενέργειας

- Η πτερωτή θεωρείται ως δίσκος που ενεργεί πάνω στο ρευστό (δίσκος ενέργειας)
 - Η αιολική μηχανή δεν μπορεί να δεσμεύσει όλη την κινητική ενέργεια του ανέμου γιατί τότε η μάζα του αέρα που διαπερνά την πτερωτή μηχανή θα είχε στην συνέχεια μηδενική ενέργεια
- Το μέγιστο ποσό της κινητικής ενέργειας : Όριο Betz
 - Ο Betz υπέθεσε ότι έχουμε μια ιδανική πτερωτή η οποία δεν φέρει το μηχανικό εξοπλισμό της πάνω στο άξονα περιστροφής και ο αριθμός των πτερυγίων μπορεί να είναι απεριόριστος, χωρίς να παρατηρείται αντίσταση από την διέλευση του αέρα από αυτά
- Αυτές οι προϋποθέσεις επιτρέπουν να θεωρηθεί ότι:
 - Υπάρχουν ομοιόμορφες συνθήκες σε όλη την περιοχή σάρωσης της πτερωτής
 - Η ταχύτητα του αέρα, τόσο διαμέσου της πτερωτής όσο και μακριά από αυτή είναι αξονική

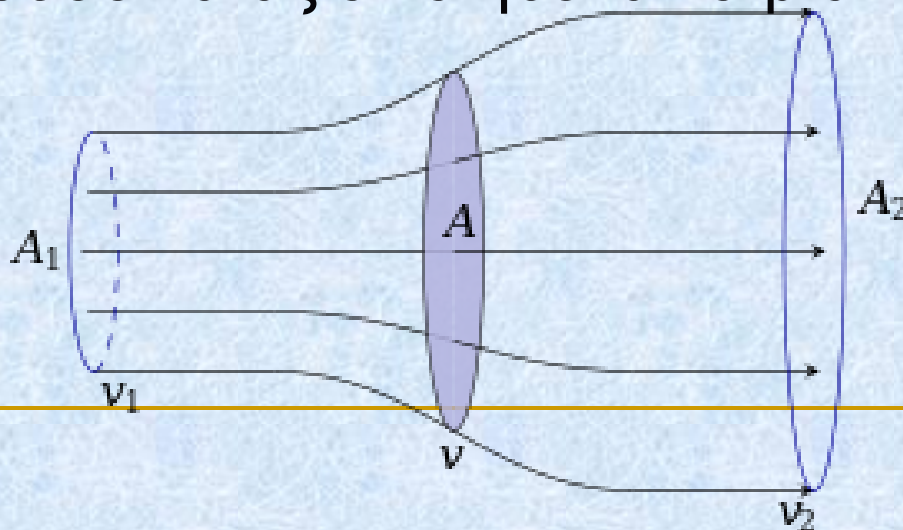
Θεωρία Δίσκου Ενέργειας

- Η διάμετρος μίας ιδανικής πτερωτής, τοποθετημένη μέσα σε φλέβα κινούμενου αέρα ορίζει τον ροϊκό σωλήνα του ανεμοκινητήρα
- Ο αέρας πολύ μακριά (στο άπειρο) στα προσήνεμα του δίσκου έχει πίεση p και πλησιάζει τον δίσκο με ταχύτητα U .
- Ο δίσκος αφαιρεί ενέργεια από τον αέρα και υπήνεμα από τον δίσκο όπου η πίεσή του αέρα θα έχει αποκατασταθεί από την πίεση του περιβάλλοντος p , η ταχύτητα του ανέμου θα είναι V μικρότερη από την U ($V < U$)
- Λόγω διατήρησης της μάζας μέσα στον ροϊκό σωλήνα θα πρέπει η διατομή του ροϊκού σωλήνα να μεγαλώνει πίσω από την πτερωτή

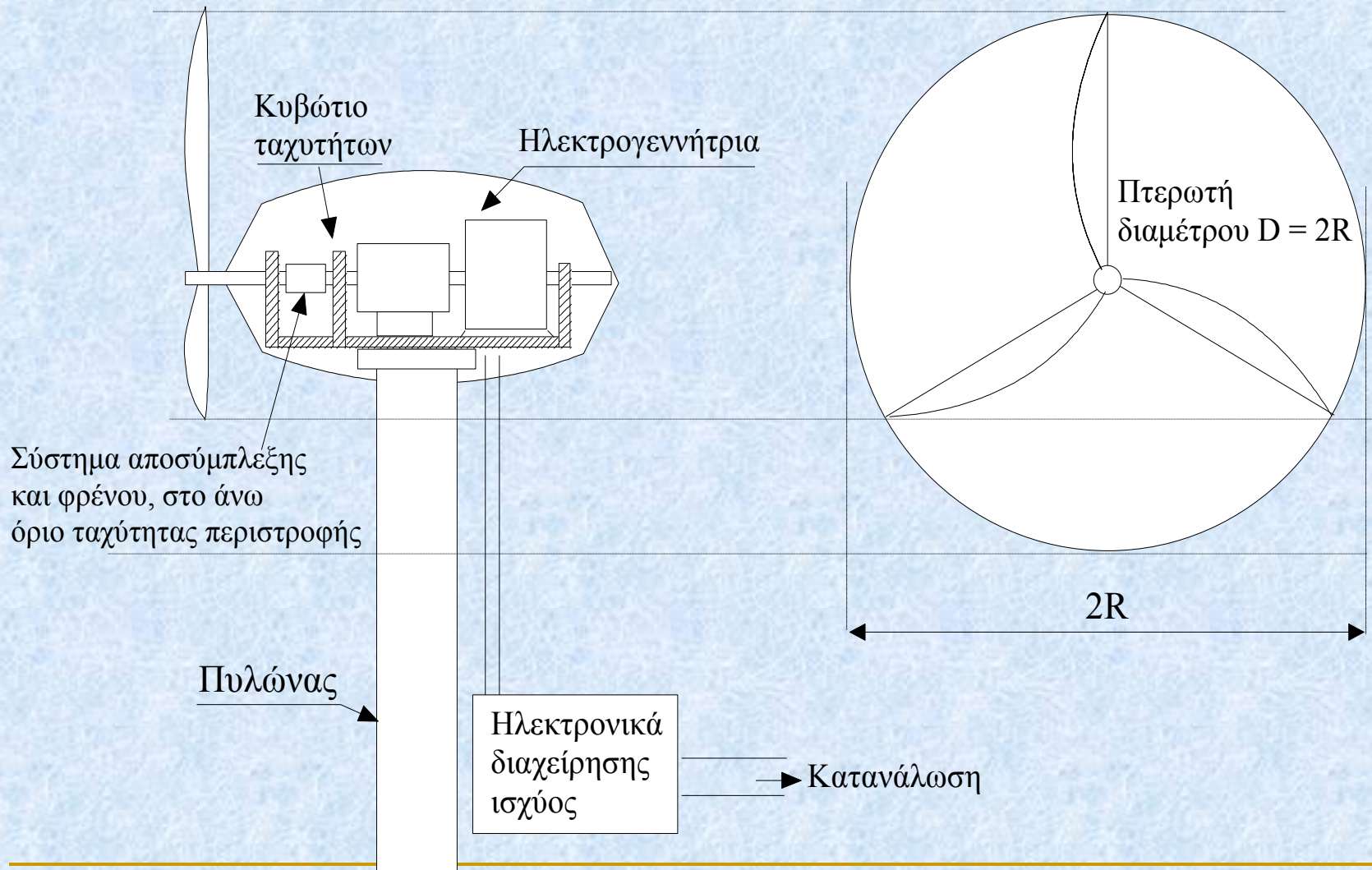
Μετατροπή της αιολικής ενέργειας σε περιστροφική

$$P_{M,μεγ} = C_{p,μεγ} \cdot P_{αν}$$

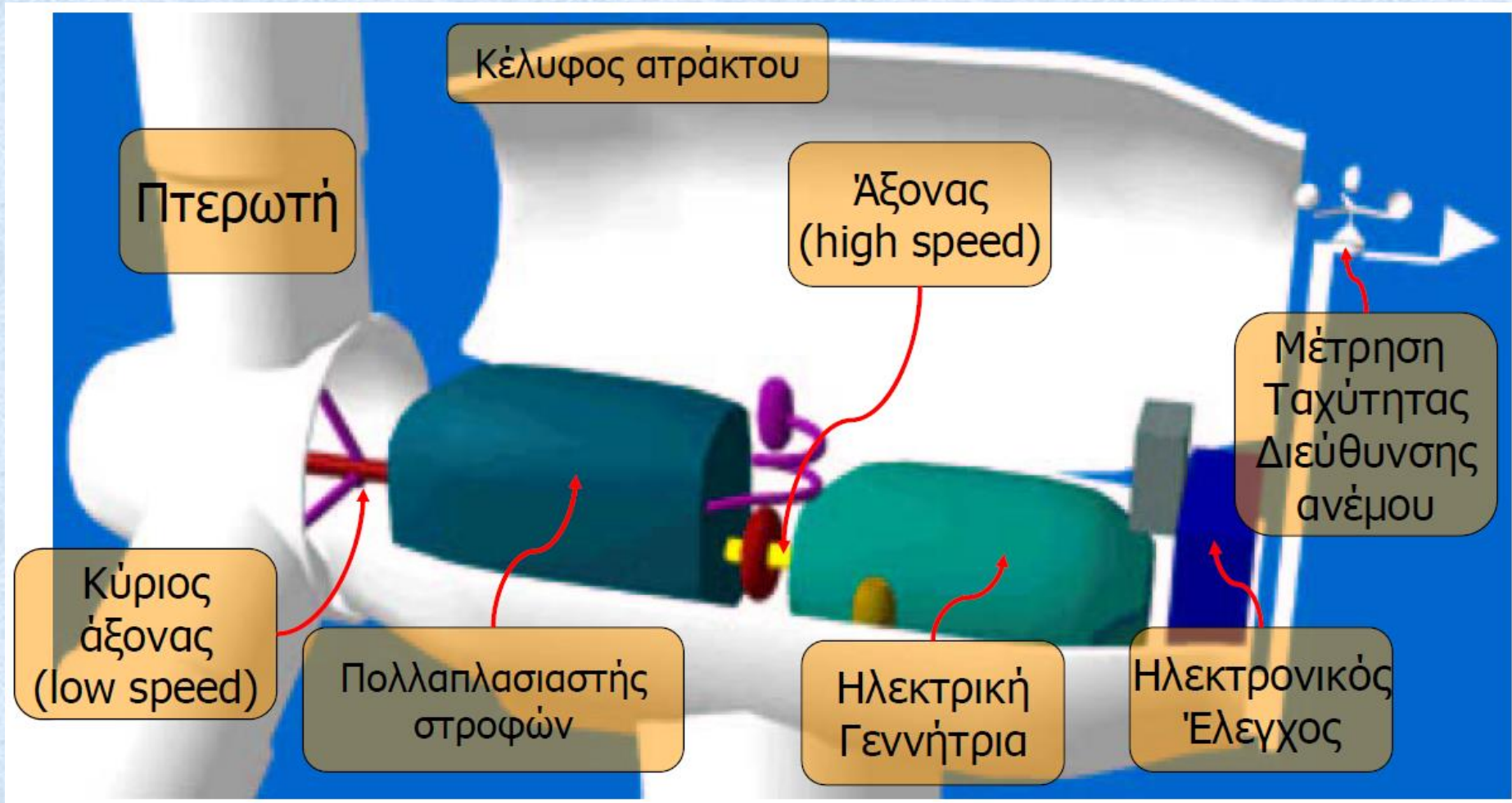
όπου $C_{p,μεγ}$, ο ιδανικός συντελεστής (μηχανικής) απόδοσης της αιολικής μηχανής. Όπως προκύπτει, έχει την τιμή 0,593 και ονομάζεται όριο *Betz*. Δηλαδή, ιδανικά, μόνο το 59,3% της $P_{αν}$, θα μπορούσε να αξιοποιηθεί από μια πτερωτή.



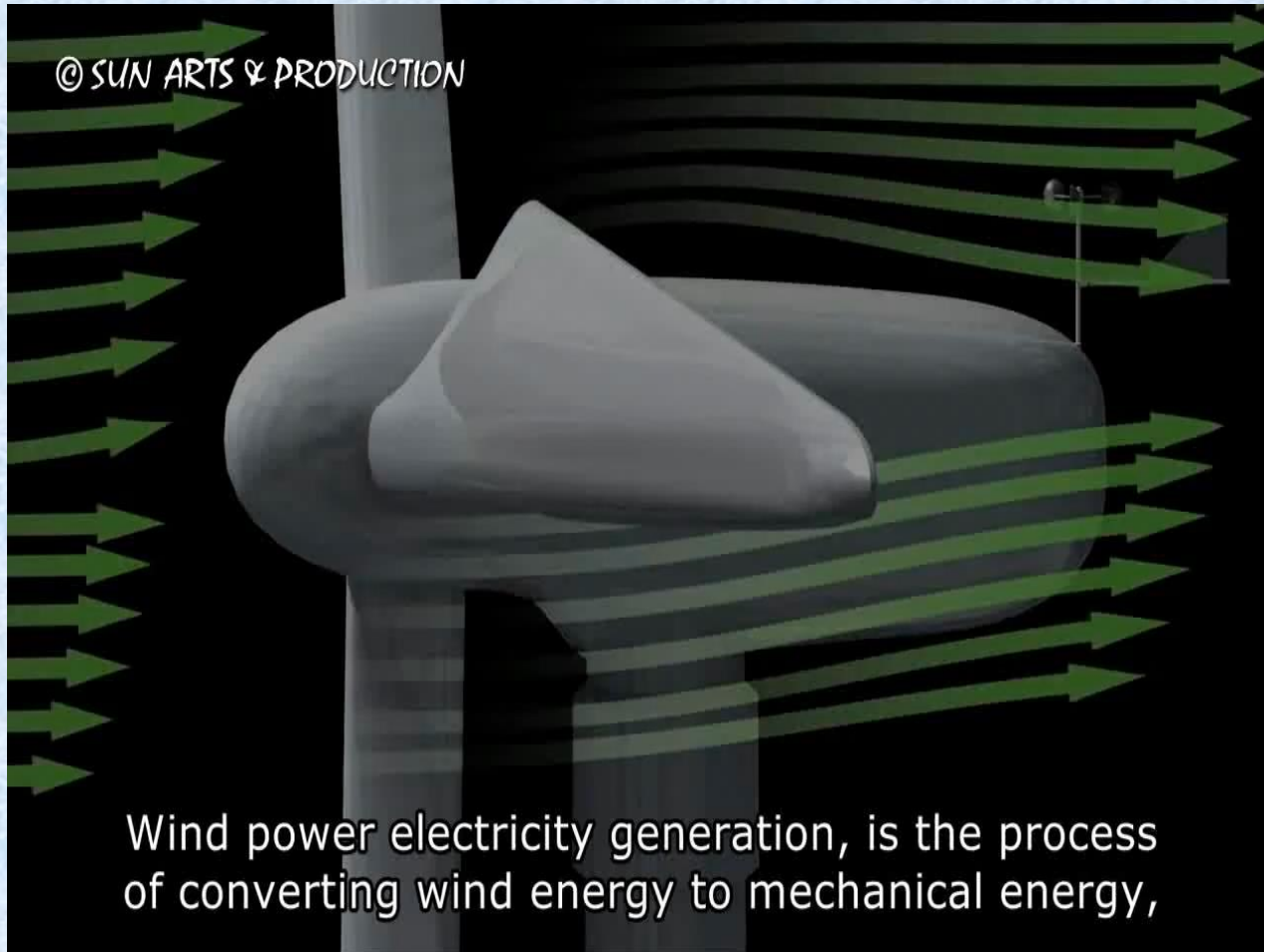
Ανεμογεννήτρια



Ανεμογεννήτρια



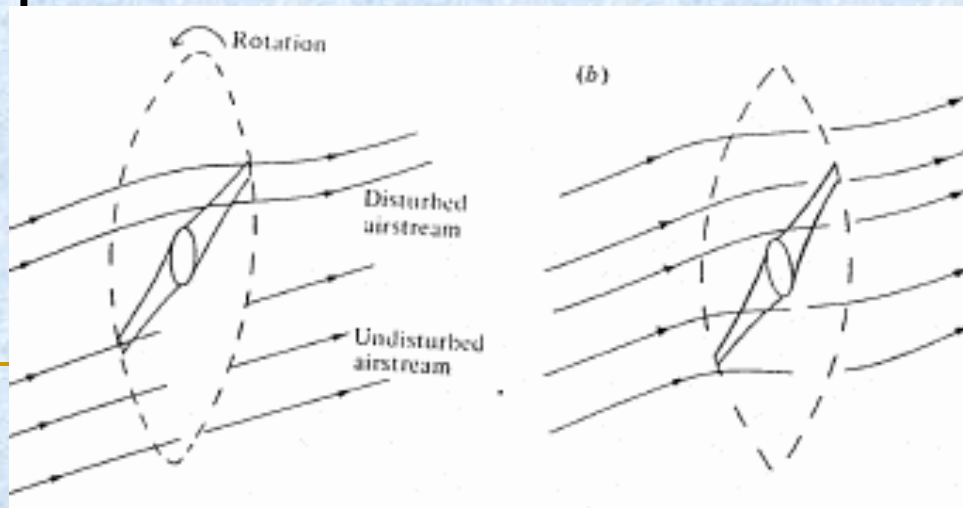
Ανεμογεννήτρια



Wind power electricity generation, is the process of converting wind energy to mechanical energy,

Δυναμική συμπεριφορά αιολικής μηχανής

- Η απόδοση μιας αιολικής μηχανής επηρεάζεται από την απόσταση μεταξύ των πτερυγίων για δεδομένες ταχύτητες ανέμου
- Η συχνότητα περιστροφής των πτερυγίων πρέπει να προσαρμόζεται με την ταχύτητα του ανέμου



Δυναμική συμπεριφορά αιολικής μηχανής

- Ο συντελεστής απόδοσης μιας αιολικής μηχανής εξαρτάται από:
- Λόγος της ταχύτητας ακροπτερυγίου λ :

$$\lambda = \frac{\text{ταχύτητα άκρου}}{\text{ταχύτητα ανέμου}} = \frac{R\omega}{u}$$

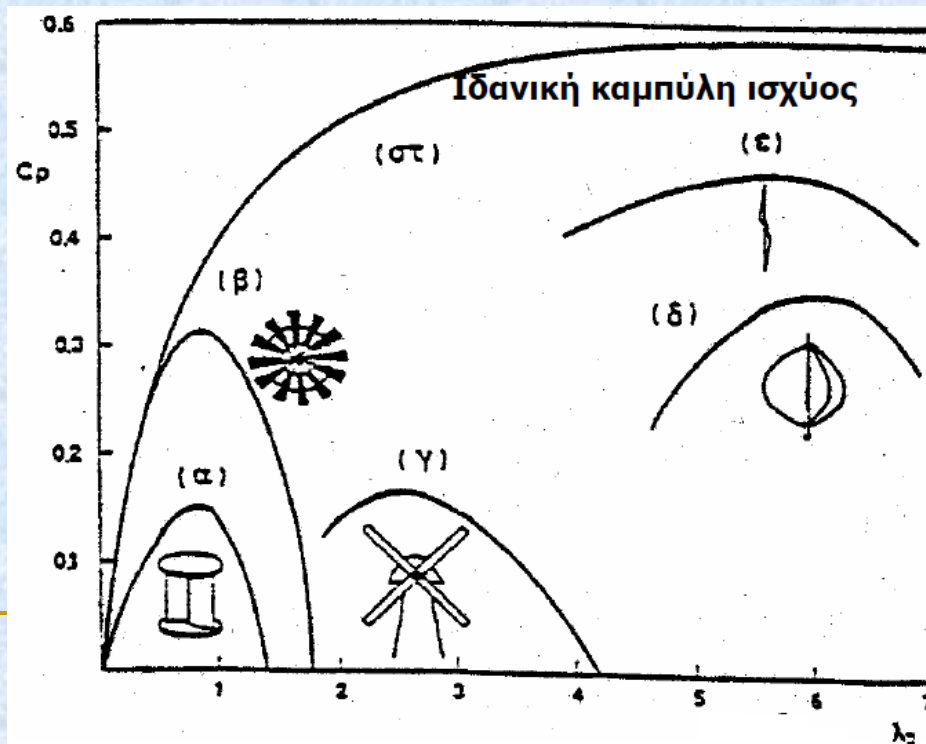
- Για μέγιστη ισχύ έχουμε:

$$\lambda = \frac{2\pi R\omega}{nd} = \frac{2\pi}{kn}$$

- όπου n ο αριθμός των ακροπτερυγίων, d το πλάτος του ακροπτερυγίου και $k=d/R$
 - Όταν $k=1/2$ το λ γίνεται μέγιστο, οπότε για μια αιολική μηχανή με n πτερύγια έχουμε: $\lambda_0=4*\pi/n$

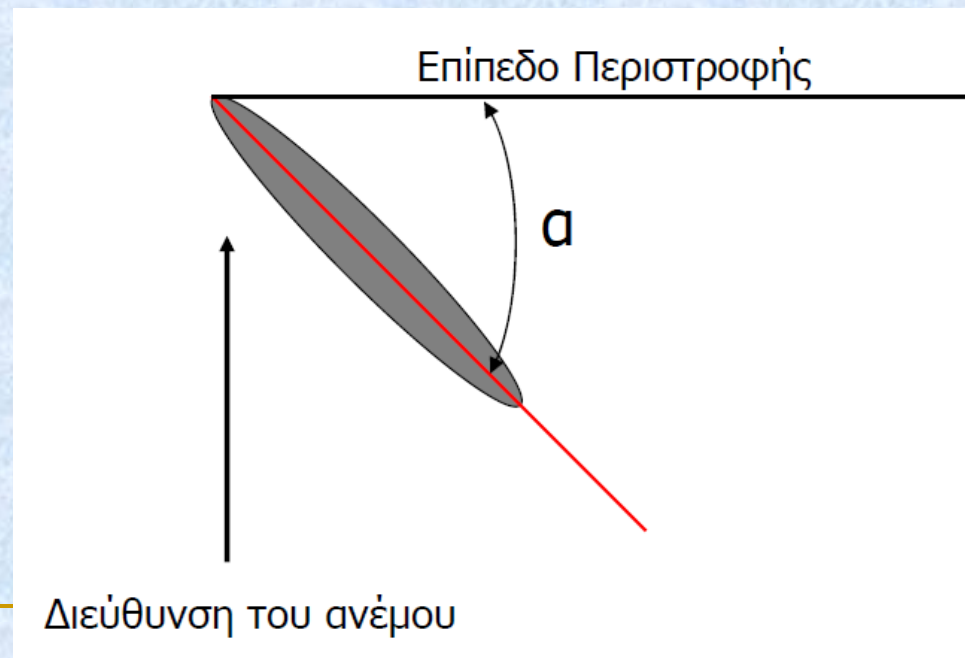
Δυναμική συμπεριφορά αιολικής μηχανής

- Η ιδανική καμπύλη ισχύος τείνει ασυμπτωτικά στο όριο Betz
- Μεγάλες διαφορές στις διάφορες μηχανές:
 - (β) πολύπτερη αιολική μηχανή → μεγάλη διακύμανση του συντελεστή ισχύος και το C_p λαμβάνει μικρές τιμές
 - (ε) γρήγορη αιολική μηχανή με 2 πτερύγια → μικρή διακύμανση και μεγάλες τιμές



Δυναμική συμπεριφορά αιολικής μηχανής

- Η γωνία πρόσπτωσης α η οποία ορίζεται ως η γωνία μεταξύ της χορδής του πτερυγίου (μήκος πτερυγίου) και του επιπέδου στροφής του πτερύγιου



Δυναμική συμπεριφορά αιολικής μηχανής

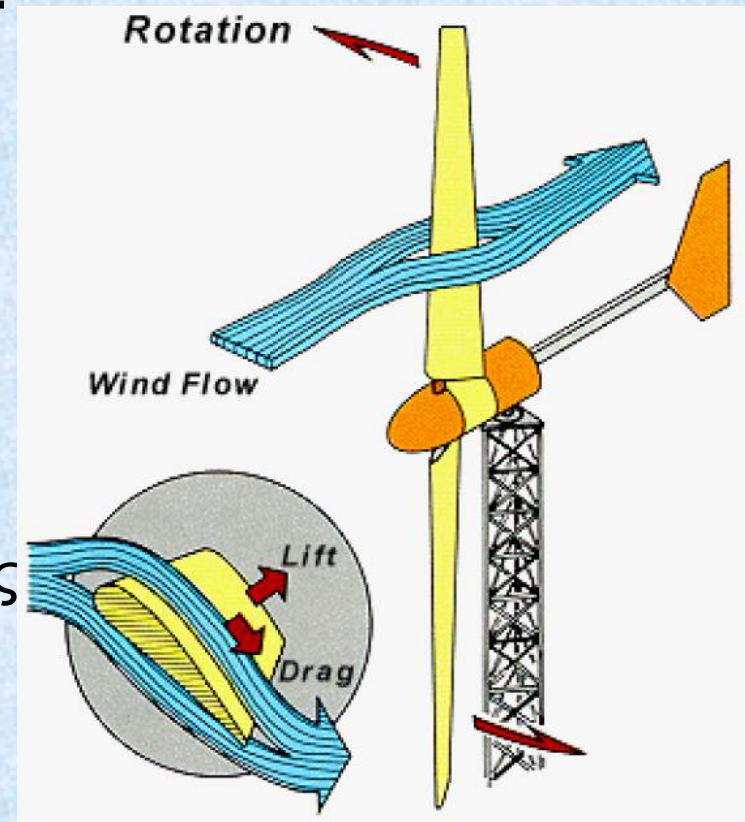
■ Δύο είναι οι βασικές δυνάμεις:

□ Ανωστική δύναμη

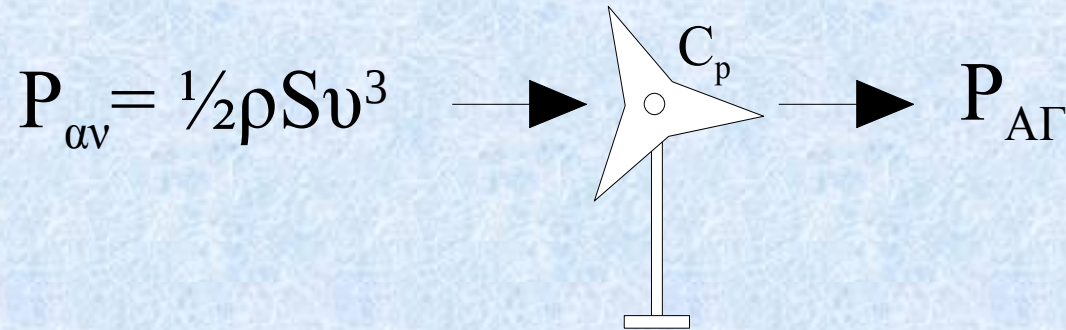
- Η ανωστική δύναμη είναι κάθετη στην οπισθέλκουσα, η οποία εμποδίζει την περιστροφή

□ Οπισθέλκουσα δύναμη

- Ένας από τους βασικούς στόχους του αεροδυναμικού σχεδιασμού της πτερωτής είναι η κατασκευή πτερυγίων με υψηλό λόγο ανωστικής προς οπισθέλκουσα



Ηλεκτρική ισχύς από ανεμογεννήτρια



$$P_{AG} = \frac{1}{2} \cdot \eta_{μηχ} \cdot \eta_{ηλ} \cdot \rho \cdot C_p \cdot S \cdot v^3$$

όπου C_p ο συντελεστής απόδοσης της πτερωτής
 $\eta_{μηχ}$ ο συντελεστής απόδοσης μηχανικών μερών
 $\eta_{ηλ}$ ο συντελεστής απόδοσης της ηλεκτρογεννήτριας

Απόδοση ανεμογεννήτριας

$$\eta_{ΑΓ} = \frac{P_{ΑΓ}}{P_{αν}} = \eta_{μηχ} \cdot \eta_{ηλ} \cdot C_p$$

Πραγματική απόδοση: 25% - 30%

Ενέργεια από τον άνεμο

- ❑ Δεν είναι ο βασικός σκοπός να κατασκευάζουμε ανεμογεννήτριες με υψηλή απόδοση
- ❑ Αυτό που έχει πραγματικά σημασία είναι το κόστος της παραγόμενης ενέργειας (€/kWh) από τον άνεμο τα επόμενα 20 χρόνια
- ❑ Από την στιγμή που το «καύσιμο» είναι δωρεάν δεν υπάρχει λόγος να κάνουμε εξοικονόμηση ενέργειας στην αιολική
- ❑ Η βέλτιστη Α/Γ δεν είναι απαραίτητα αυτή που παράγει την περισσότερη ενέργεια ανά έτος, αλλά αυτή που παράγει την φθηνότερη
- ❑ Από την άλλη κάθε τετραγωνικό μέτρο πτερωτής έχει οικονομικό κόστος οπότε αυτό που είναι σημαντικό είναι να συλλέγεται όση ενέργεια είναι δυνατόν κρατώντας χαμηλό το κόστος ανά kWh

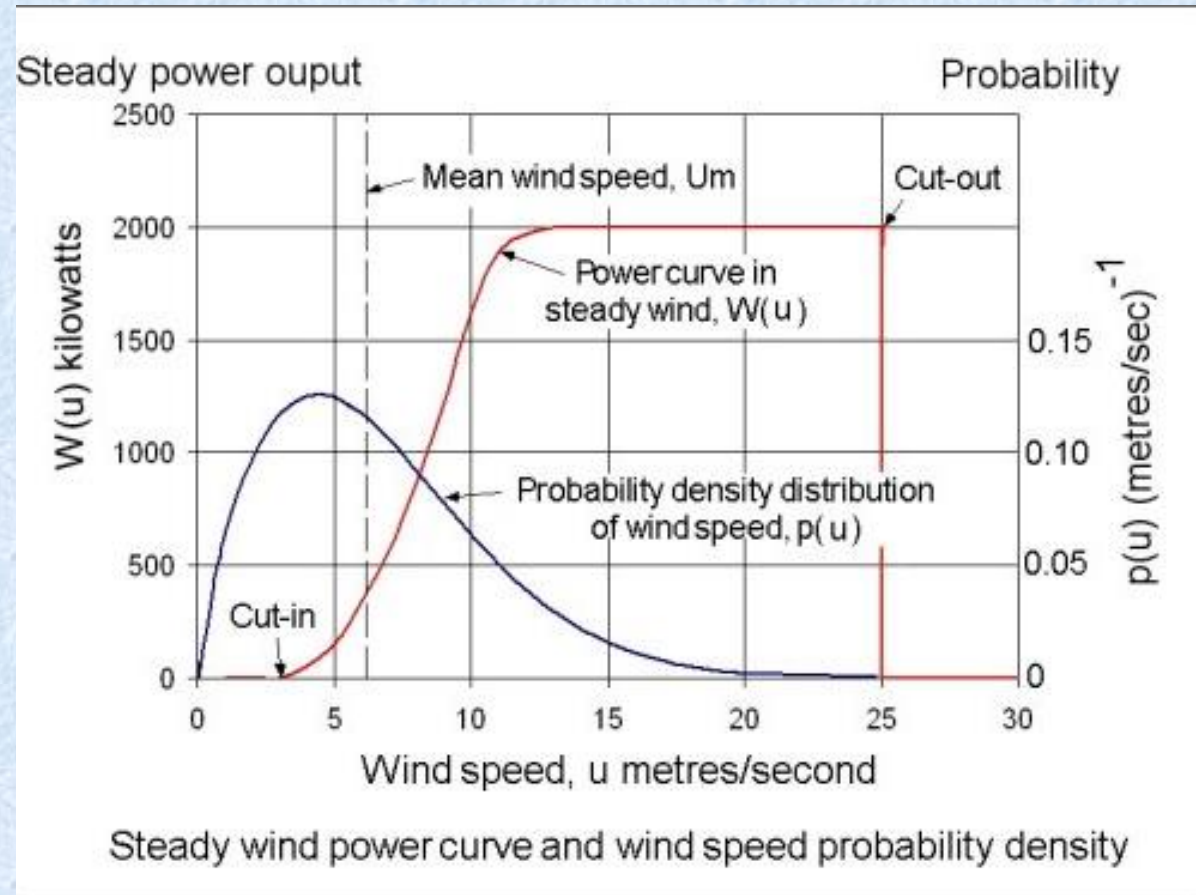
Χαρακτηριστική καμπύλη ανεμογεννήτριας Βασικά χαρακτηριστικά

Χαρακτηριστικές ταχύτητες

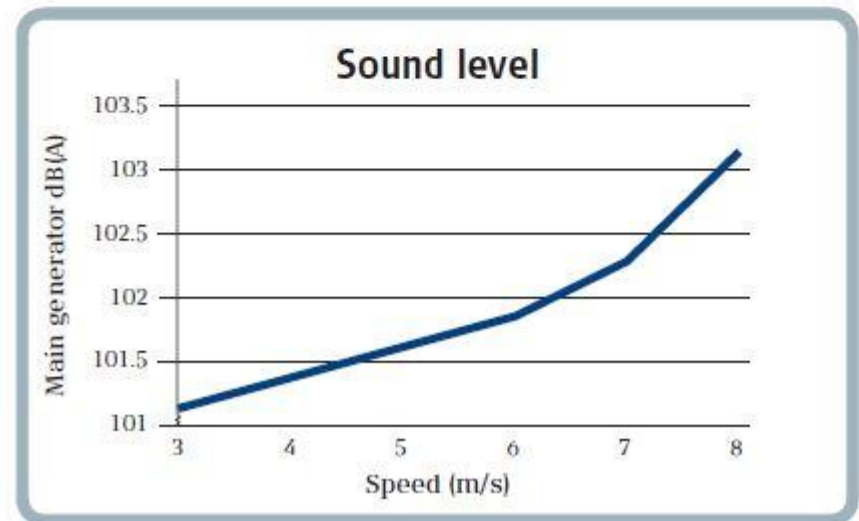
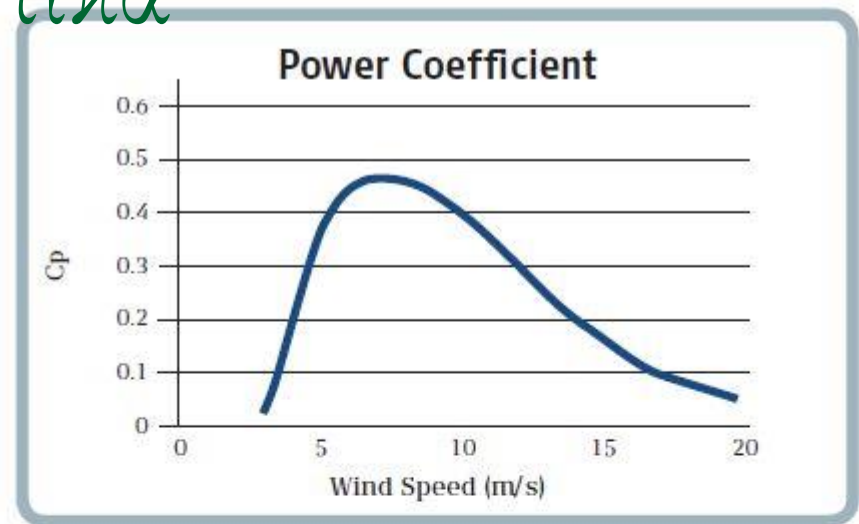
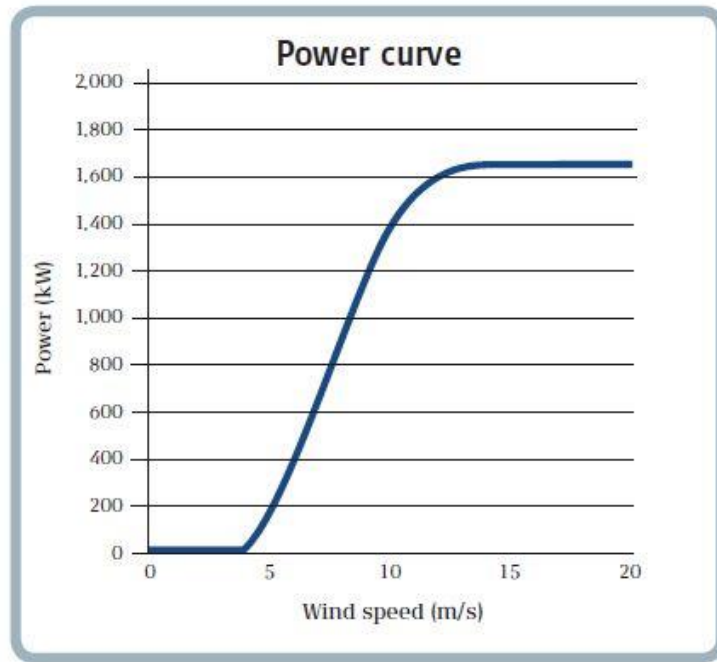
$U_{\text{cut-in}}$: Η ταχύτητα έναρξης λειτουργίας

U_{rated} : Η ονομαστική ταχύτητα

$U_{\text{cut-out}}$: Η ταχύτητα εξόδου



Τυπικά χαρακτηριστικά



Ανεμογεννήτρια

WIND TURBINE

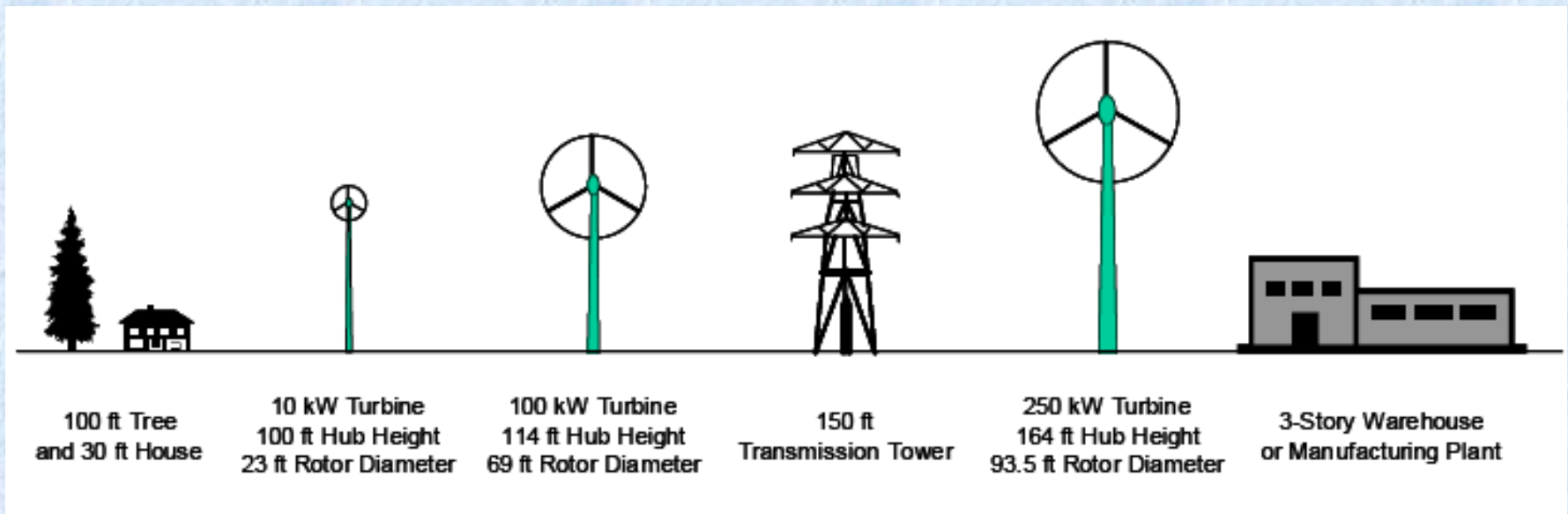


www.LearnEngineering.org

Πτερόγια και πυλώνας



Συσχέτιση μεγέθους ανεμογεννήτριας με άλλες κατασκευές



Δυνάμεις

- Ισχυρές δυνάμεις στις πτέρυγες (μεταβολές στην ταχύτητα του ανέμου)
- Η ιδιοσυχνότητα εξαρτάται από το ύψος του πύργου, πάχος τοιχωμάτων, υλικά, βάρος κελύφους και ρότορα.

Ενδεικτικά, $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$. $D=55$ μέτρα. Ένας κύλινδρος μήκους 1 μέτρου και διαμέτρου D περιέχει αέρα που ζυγίζει περίπου 2400 κιλά.

Δυνάμεις



Τύποι πυλώνων



Σχήμα 3.5 Ανεμογεννήτριες με χαλύβδινους σωληνοειδείς πύργους



Πυλώνας δικτυώματος

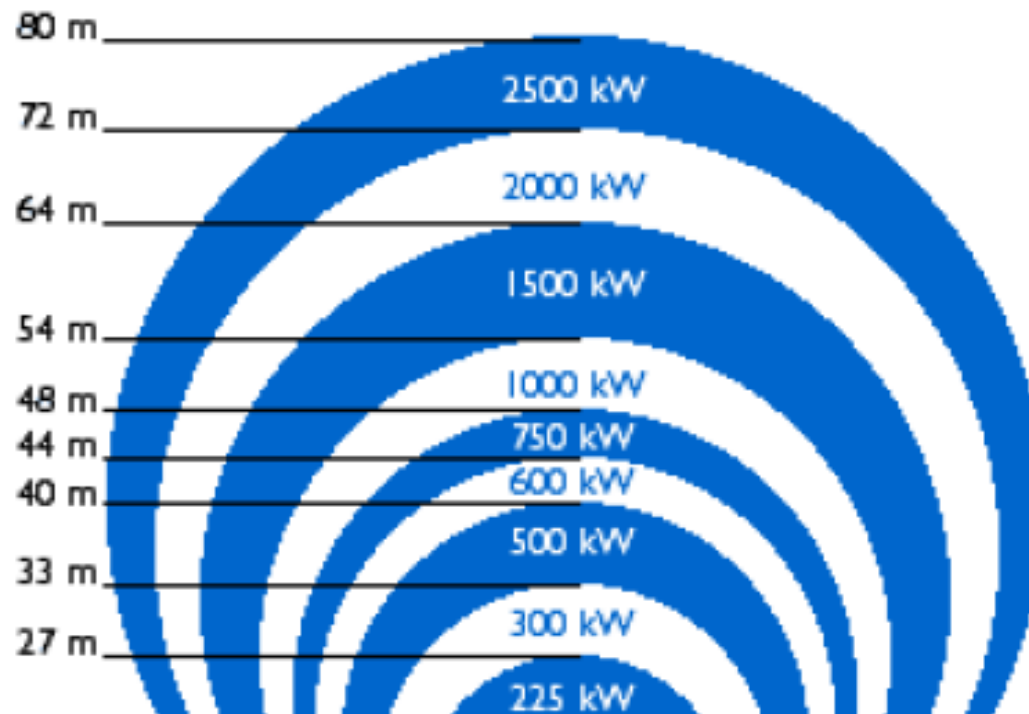
Χερσαία αιολικά πάρκα



Θαλάσσια αιολικά πάρκα



Πυλώνας – ισχύς ανεμογεννήτριας



Χερσαία αιολικά πάρκα



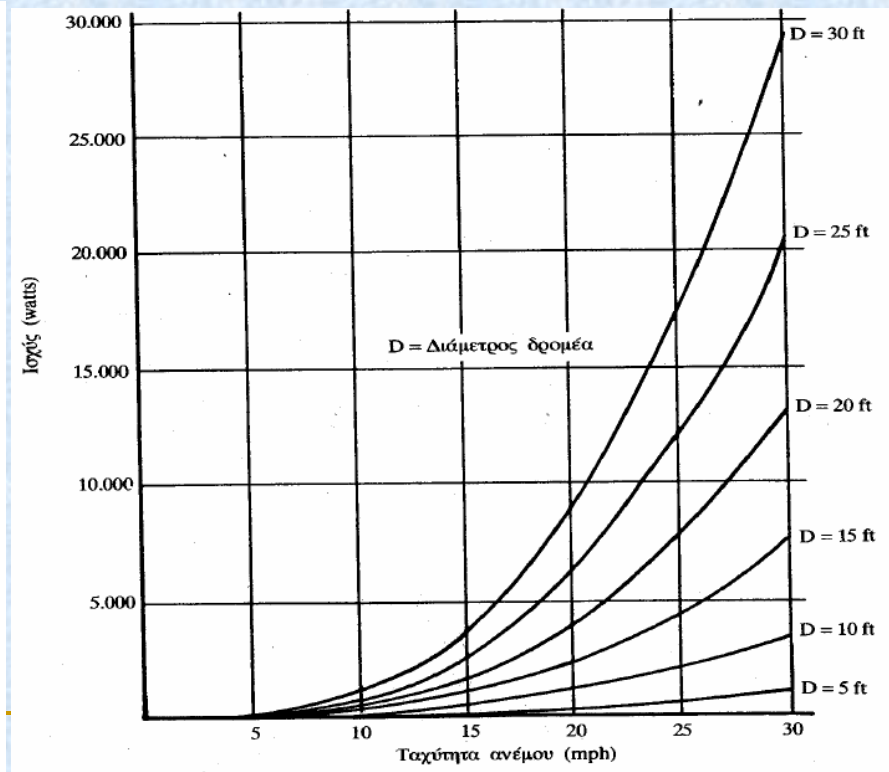
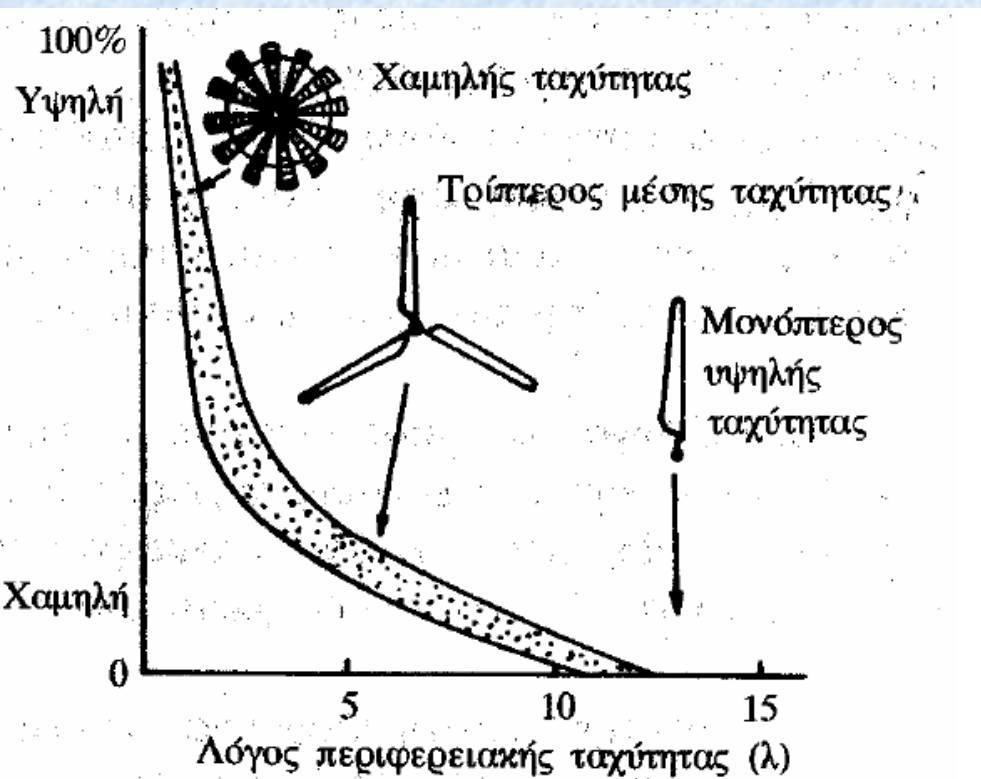
Διάμετρος πτερωτής και αποδιδόμενη ηλεκτρική ισχύς

Κατηγοριοποίηση ΑΓ με βάση το μέγεθος

Κατηγορία	Διάμετρος πτερωτής	Αποδιδόμενη ηλεκτρική ισχύς
Micro	0,5 – 1,25 m	20 - 300 watts
Mini	1,25 - 2,75 m	300 - 850 watts
Household	2,75 - 7 m	850 watts - 10 kW
Industrial	7 - 30 m	10 kW - 100 kW
Utility	30 - 90 m	100 kW - 4 MW

Πρακτικά στοιχεία επιλογής ανεμογεννητριών

- Εκτίμηση ενεργειακών αναγκών
- Εκτίμηση διαστάσεων αιολικής μηχανής
- Ισχύς



Συντελεστής αξιοποίησης ισχύος ΑΓ, CF_{AG}

$$CF_{AG} = \frac{\bar{P}_{AG}}{P_R} = \int \eta_{AG}(v) \cdot f(v) dv, \text{ όπου } \eta_{AG}(v) = \frac{P_{AG}(v)}{P_R}$$

Στην πράξη, αντί της $f(v)$ χρησιμοποιούμε τη συνάρτηση Weibull, με c και k προσδιορισμένα ετησίως ή μηνιαίως, από τα δεδομένα ταχύτητας ανέμου της περιοχής εφαρμογής. Το $\eta_{AG}(v)$ προκύπτει από τη χαρακτηριστική καμπύλη $P_{AG}-v$ (Δεδομένο από τον κατασκευαστή).

$$CF_{AG} = \sum_i \eta_{AG}(v_i) \cdot f_W(v_i) \cdot \Delta v,$$

όπου $f_W(v_i)$, η συνάρτηση Weibull
και Δv , το βήμα ταχύτητας ανέμου

Προσδιορισμός παρερχομένης ενέργειας από ΑΓ

$$\begin{aligned} E_{ΑΓ} &= \bar{P}_{ΑΓ} \cdot T \\ &= P_R \cdot CF_{ΑΓ} \cdot T \end{aligned}$$

όπου T , η περίοδος αναφοράς: ημέρα, μήνας, έτος, στην οποία αναφέρεται η μέση τιμή ισχύος $\bar{P}_{ΑΓ}$ και η τιμή του $C_{ΑΓ}$.

Παράδειγμα υπολογισμού ΑΓ

Έστω ότι θέλουμε να καλύψουμε τις ενεργειακές απαιτήσεις μιας εφαρμογής, όπως αναφέρονται στην 1^η στήλη του επόμενου πίνακα, με ΑΓ. Ποια η ονομαστική ισχύς της απαιτούμενης ΑΓ;

Με βάση τις μηνιαίες τιμές των c και k για τον τόπο εφαρμογής, προσδιορίζονται οι μηνιαίες τιμές του $CF_{ΑΓ}$, όπως παρουσιάστηκε σε προηγούμενη διαφάνεια. Η κάλυψη των ενεργειακών απαιτήσεων επιβάλλει τη σχέση:

$$E_{ΑΓ} \geq \frac{m \cdot E_L}{\eta_{μετ}}$$

όπου m , ο συντελεστής περιθωρίου (Εδώ: 1,2) και $\eta_{μετ}$, ο συντελεστής μεταφοράς της παραγόμενης ηλ. ενέργειας (Εδώ: 0,7).

Μήνες	$\bar{E}_L$ kWh	$CF_{ΑΓ}$	P_R
Ιανουάριος	14	0,35345	2,8
Φεβρουάριος	13	0,26839	3,5
Μάρτιος	12	0,21437	4,0
Απρίλιος	12	0,19346	4,4
Μάιος	11	0,24385	3,2
Ιούνιος	11	0,31023	2,5
Ιούλιος	12	0,34594	2,5
Αύγουστος	12	0,22047	3,9
Σεπτέμβριος	12	0,29932	2,9
Οκτώβριος	14	0,19032	5,3
Νοέμβριος	13	0,35874	2,6
Δεκέμβριος	14	0,30245	3,3

Επιλογή ονομ. ισχύος ΑΓ

Για κάλυψη των ενεργειακών απαιτήσεων της εφαρμογής επιλέγεται η ονομαστική τιμή $P_R = 5,3 \text{ kW}$, που αντιστοιχεί στον πιο απαιτητικό μήνα, δηλαδή, τον Οκτώβριο.